

doi: 10.3788/gzxb20174607.0704001

L-C 耦合电路对散粒噪声探测器电子学噪声的影响

王少锋^{1,2}, 董瑞芳^{1,2}, 刘涛^{1,2}, 张首刚^{1,2}

(1 中国科学院国家授时中心 频率与时间基准重点实验室, 西安 710600)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过分析基于 L-C 耦合跨阻运放电路的散粒噪声探测器噪声来源, 提出了电感的寄生电容对电子学噪声影响的分析模型, 并进行了实验验证. 研究表明, 电感的寄生电容会增大跨阻运放的输入电压噪声增益, 从而增加探测器的电子学噪声. 当总电感值为 1 mH 时, 选用两个 0.5 mH 的电感串联结构相比选用单个 1 mH 的电感, 探测器电子学噪声明显降低. 由于电感的自共振频率越低, 寄生电容越大, 选用高自共振频率的电感有助于进一步降低电子学噪声. 实验测量得到, 在 2.5 MHz 分析频率处, 选用两个 0.5 mH、自共振频率为 6 MHz 的电感串联相比选用单个 1 mH、自共振频率为 1.6 MHz 的电感, 电子学噪声的降低了 3 dB. 在相同入射激光条件下, 该改进模型可以有效提高探测器的信噪比.

关键词:探测器; 电子学噪声; 电感寄生电容; 散粒噪声探测器; 自共振频率; L-C 耦合电路; 跨阻放大器

中图分类号: O431.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)07-0704001-6

Effect of L-C Combination Circuit on Electronic Noise of Shot Noise Photodetector

WANG Shao-feng^{1,2}, DONG Rui-fang^{1,2}, LIU Tao^{1,2}, ZHANG Shou-gang^{1,2}

(1 Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Science, Xi'an 710600, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By analyzing the electronic noise sources of shot noise photodetector based on the L-C coupled transimpedance amplifier circuit, the effect of the parasitic capacitance of the utilized inductance on the electronic noise was theoretically investigated and experimentally validated. The result shows that the parasitic capacitance of the inductor may increase the electronic noise of the detector via increasing the input voltage noise gain of the transimpedance amplifier. Given that the total inductance of the L-C circuit is 1 mH, the contribution to the electronic noise of choosing two series inductor with 0.5 mH each is much smaller than that of choosing a single inductor with 1mH. Furthermore, the higher the self resonant frequency of the inductor is, the smaller the parasitic capacitance and thus the smaller the electronic noise will be. The experiment results show that, at the analyzing frequency of 2.5 MHz, the electronic noise reduction of the two inductors in series with inductance of two 0.5 mH and resonance frequency of 6 MHz can reach up to 3 dB, compared to that using a single 1 mH inductor with the resonance frequency of 1.6 MHz. Under a certain incident optical power, the signal-to-noise ratio of the detector can be thus improved effectively.

Key words: Detector; Electronic noise; Parasite capacitance of inductor; Shot noise detector; Self-resonant frequency; L-C combination circuit; Transimpedance amplifier

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 91336108, 11273024, 91636101, Y133ZK1101)、中组部“青年拔尖人才”支持计划项目(No. 中组字[2013]33号)、中国科学院科研装备研制项目和中国科学院前沿科学重点研究项目(No. QYZDB-SSWSLH007)资助

第一作者:王少锋(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为量子时间同步. Email: 354498497@qq.com

导师(通讯作者):董瑞芳(1977-),女,教授,博士,主要研究方向为量子时间同步. Email: dongruifang@ntsc.ac.cn

收稿日期:2017-01-22; **录用日期:**2017-03-31

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光场压缩态是量子通信,量子计算的重要资源^[1-3],为实现对光场压缩特性的有效探测,平衡零拍探测^[4]技术被提出并广泛应用.平衡零拍探测系统中要求两个探测器具有相同的性能,而且单个探测器应具有较高的灵敏度和低噪声特性.当入射光场达到散粒噪声极限时,散粒噪声功率和电子学噪声功率的比值称为探测器的信噪比(SNR).为降低电子学噪声对量子光源可测量的压缩特性的影响,要求探测器的信噪比在 10 dB 以上,才能避免散粒噪声被探测器的电子学噪声淹没.实际上,有限的信噪比等效于测量装置的损耗^[5],一定程度上降低了量子光源可测量的压缩特性,因此,需要尽可能降低探测器的电子学噪声,提高信噪比.

基于直流耦合的标准跨阻光电探测器并不适合量子光学实验中散粒噪声的探测^[6].随着光强增加,直流电流迅速增大,使跨阻运放饱和,这严重降低了探测器的动态响应范围.基于 L-C 耦合跨阻运放电路的散粒噪声探测器将直流电流和交流电流分别放大,避免了直流电流对散粒噪声电流的饱和效应^[7-8],提高了探测器的动态响应范围,被广泛应用于量子光学实验.散粒噪声探测器主要由光电二极管、交流放大、直流通路三部分构成.光电二极管将接收到的光信号转换成光电流,由光电二极管输出的光电流被分成直流(DC)和交流(AC)两部分.DC 电流被低通滤波和放大后,用于衡量入射光场的强度.AC 电流被跨阻放大电路进行放大,输出的噪声功率对应光场的散粒噪声.在设计跨阻放大电路时,要尽量减小电子学噪声,提高探测器的信噪比,同时需要兼顾输出信号的频率特性,使探测器的 AC 和 DC 动态响应范围能够满足量子光学实验的要求.

探测器的电子学噪声主要由光电二极管的电子学噪声和放大器的电子学噪声两部分组成.尽管 L-C 耦合跨阻运放电路非常适合散粒噪声的探测,但是由于光电二极管的结电容、跨阻运放的输入电容、电路寄生电容等影响,微弱的散粒噪声信号很容易被电子学噪声淹没.选择电子学噪声更低的电路元件^[9],并优化印刷电路板布局可以一定程度降低探测器的电子学噪声^[10].近来,研究表明采用自举结构,可以降低光电二极管的结电容,有效降低跨阻运放的输入电压噪声增益,从而降低探测器的电子学噪声^[6].该方法主要对大结电容的光电二极管效果比较明显.本文分析了 L-C 耦合电路中电感 L 的寄生电容对探测器电子学噪声的影响,对 L-C 耦合电路中的电感进行改良,即采用串联两个高自共振频率的电感来代替单个低自共振频率的电感,以有效降低跨阻运放电路的输入电压噪声增益,从而降低跨阻运放电路的电子学噪声.

1 探测器电子学噪声分析

在跨阻放大电路中,光电二极管可以等效于一个电流源,光电流经过跨阻放大器转换成光电压输出.当入射激光达到散粒噪声极限时,输出信号来自光场的散粒噪声即光电流的散粒噪声^[11],其谱密度表示为 I_{shot} ,即

$$I_{\text{shot}} = \sqrt{2qI_d} \quad (1)$$

$$I_d = P \times \rho \quad (2)$$

式中, q 为电子电量, I_d 是光电流, P 是入射光功率, ρ 是光电二极管的灵敏度.散粒噪声电压谱密度表示为 e_{shot} ,即

$$e_{\text{shot}} = I_{\text{shot}} \times |Z_s| \quad (3)$$

$$Z_s = R_f // (1/2\pi i f C_f) = \frac{R_f}{1 + i2\pi f C_f R_f} \quad (4)$$

式中, Z_s 是跨阻放大电路的增益阻抗, R_f 是反馈电阻, C_f 为反馈电容, f 是分析频率.

然而实际中由于受光电二极管暗电流、反馈电阻热噪声、PCB 杂散电容、放大器电子学噪声等影响,探测器的交流输出端除了信号外还混杂有复杂的电子学噪声信号.基于 L-C 耦合跨阻放大电路的散粒噪声探测器的噪声模型^[12]如图 1 所示,字母 e 代表电压噪声,字母 I 代表电流噪声.探测器的电子学噪声主要由光电二极管电子学噪声和放大器电子学噪声两部分组成,可表示为

$$e_{\text{noise}} = \sqrt{e_{\text{PD}}^2 + e_{\text{nop}}^2} \quad (5)$$

PIN 光电二极管内部电子学噪声 e_{PD} 包括:结电阻的热噪声和光电二极管中存在的暗电流而导致的随机

噪声. 给定光电二极管的结电阻为 R_d , 暗电流为 I_k , e_{PD} 可以表示为

$$e_{PD} = \sqrt{\frac{4KT}{R_d} + 2qI_k} \times |Z_s| \quad (6)$$

式中 $K=1.38 \times 10^{-23}$ J/K 表示玻尔兹曼常量, T 表示绝对工作温度, Z_s 是跨阻放大电路的增益阻抗, 同式(4).

放大器的电子学噪声 e_{nop} 主要包括三部分^[13], 分别为放大器的热噪声 e_{noR} , 由放大器的输入电流噪声和输入电压噪声分别产生的噪声输出 e_{noi} 和 e_{noe} .

放大器的热噪声可以表示为

$$e_{noR} = \sqrt{\frac{4KT}{R_r}} \times |Z_s| \quad (7)$$

由放大器的输入电流噪声 I_{noi} 产生的噪声输出 e_{noi} 为

$$e_{noi} = I_{noi} \times |Z_s| \quad (8)$$

由放大器的输入电压噪声 e_{in} 产生的噪声输出 e_{noe} 为

$$e_{noe} = e_{in} \times |Z_n| \quad (9)$$

放大器输入电压噪声的增益 Z_n 表示为

$$Z_n = \frac{Z_d + Z_s}{Z_d} \quad (10)$$

其中 Z_d 为放大电路之前的阻抗, 表示为

$$Z_d = \frac{1}{\frac{1}{R_d} + 2\pi i f (C_d + C_{in}) + \frac{1}{R_{Dc} + Z_L}} \quad (11)$$

式中 C_{in} 为放大器的输入电容, 它包括共模输入电容和差模输入电容两部分, C_d 为光电二极管的结电容, R_{Dc} 表示直流负载值, Z_L 是电感的等效阻抗. 可以看到, 光电二极管的结电容和放大器的输入电容都会对输入电压噪声 e_{in} 产生高频增益. 由于 L-C 耦合电路中的电感元件在射频段的性能不可避免地存在频率依赖性^[14-16], 需要引入集总参量等效电路模型(如图 1). 在此等效电路中, R_L 、 L 和 C_L 分别表示等效串联电阻、电感和寄生电容. 则 Z_L 可表示为

$$Z_L = \frac{1}{\frac{1}{2\pi i f L + R_L} + 2\pi i f C_L} \quad (12)$$

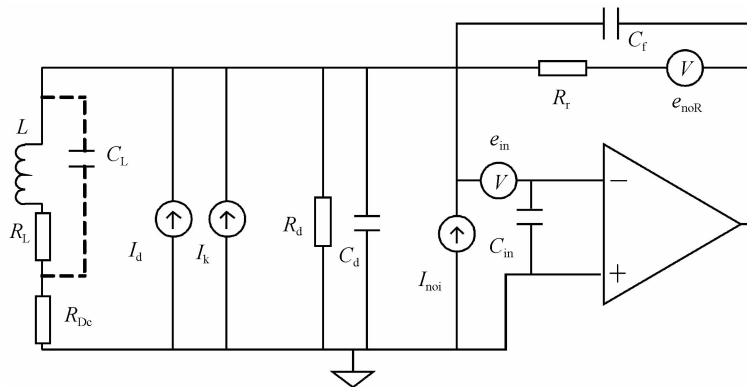


图 1 基于 L-C 耦合跨阻放大电路的散粒噪声探测器的电子学噪声模型

Fig. 1 Noise model of shot noise detector with L-C coupling and transimpedance amplifier circuit

已知电感的自共振频率(SRF)为 f_r , 电感的等效寄生电容可以通过 $C_L = 1/(4\pi^2 f_r^2 L)$ 确定. 电感的等效串联电阻 R_L 和分析频率相关^[14-16], 随着分析频率的增大, R_L 迅速增加并在 f_r 附近达到峰值. C_L 和 R_L 均会使 Z_n 变大, 从而使得由放大器输入电压噪声产生的噪声输出 e_{noe} 变大. 根据文献[12], R_L 只对 2 MHz 以下的电子学噪声有一定影响.

上述三种噪声共同组成了放大器的电子学噪声. 三种噪声互不相关, 所以放大器电子学噪声 e_{nop} 表示为

$$e_{\text{nop}} = \sqrt{e_{\text{noi}}^2 + e_{\text{noe}}^2 + e_{\text{noR}}^2} \quad (13)$$

2 电感 L 的寄生电容对电子学噪声的影响

2.1 数值分析

实验采用文献[12]的探测器设计,光电转换器件选择滨松 S5971 硅基 PIN 型光电二极管,在 -10 V 偏压下,它的结电容仅为 $C_d = 3\text{ pF}$,具备良好的频率响应特性,暗电流为 $I_k = 70\text{ pA}$ 远低于 mA 量级的光电流,可以忽略不计,结电阻为 $R_d = 6.2\text{ G}\Omega$. 交流电路跨阻放大器选择为输入噪声极低的 ADA4817-1(AD corporation),增益带宽积 GBW 为 410 MHz ,输入电压噪声 $e_{\text{in}} = 4\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,输入电流噪声 $I_{\text{noi}} = 2.5\text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$,输入电容 $C_{\text{in}} = 1.4\text{ pF}$,反馈电容 $C_f = 0.5\text{ pF}$,反馈电阻 $R_f = 100\text{ k}\Omega$,直流负载为 $R_{\text{Dc}} = 200\text{ }\Omega$,L-C 耦合电路中选取的电感值为 $L = 1\text{ mH}$,PCB 寄生参量同文献[12].

数值分析电感的寄生电容对 e_{noe} 及电子学噪声 e_{noise} 的影响. 由于 R_L 随分析频率的变化特性难以量化分析和测量,为数值分析简便起见,假设寄生电阻不随频率变化,等于直流时的寄生电阻 $R_{L,0}$. 根据式(9)~(12),数值计算了当采用一个 $L = 1\text{ mH}$ 、 $f_r = 1.6\text{ MHz}$ (对应 $C_L = 10\text{ pF}$)、 $R_{L,0} = 14\text{ }\Omega$ 的电感时, e_{noe} 随分析频率的变化情况,如图 2 中的黑色短划线所示. 考虑到电容的串联效应,因此将 1 mH 的电感替换为两个 $L = 500\text{ }\mu\text{H}$ 且寄生电容仍为 $C_L = 10\text{ pF}$ ($f_r = 2.3\text{ MHz}$) 的电感串联的结构. 理论计算 e_{noe} 的功率随分析频率的变化情况如图 2 中的红色点划线. 由于采用串联结构,可使总的寄生电容低于单个电感的寄生电容,降低了跨阻放大器的输入电压噪声增益 Z_n ,可见 e_{noe} 在采用串联结构后降低. 进一步从工艺上考虑,小电感的寄生电容更容易比大电感的低,当采用寄生电容更小的两个 $500\text{ }\mu\text{H}$ 电感 ($f_r = 6\text{ MHz}$, $C_L = 1.4\text{ pF}$) 串联时,计算得到 e_{noe} 随分析频率的变化曲线如图 2 中的蓝色实线所示,可见降低电感的寄生电容可以进一步降低 e_{noe} 噪声.

相应地,进一步给出了上述三种情况下,探测器总的电子学噪声输出 e_{noise} 随分析频率的变化曲线,如图 3 所示.

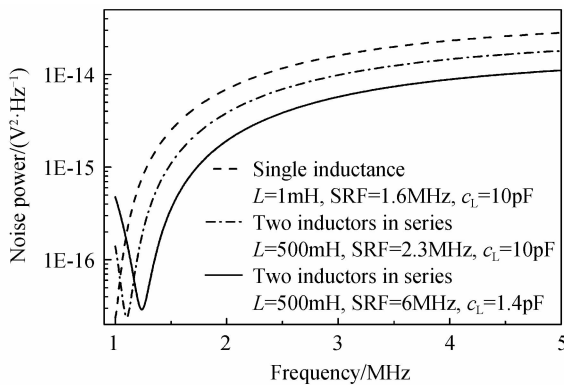


图 2 理论计算 e_{noe} 随分析频率的变化情况
Fig. 2 Theoretical calculation of e_{noe} versus the analyzing frequency

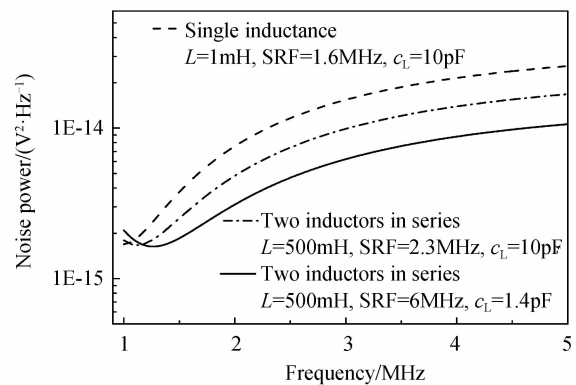


图 3 理论计算 e_{noise} 随分析频率的变化情况
Fig. 3 Theoretical calculation of e_{noise} versus the analyzing frequency

由于 ADA4817-1 的输入电流噪声在 fA 量级,所以可忽略放大器输入电流噪声引入的电子学噪声影响,探测器的电子学噪声主要由放大器的输入电压噪声和反馈电阻的热噪声引起. 通过数值模拟可以看到,采用高自共振频率电感串联结构可以有效降低探测器的电子学噪声. 在分析频率 2.5 MHz 处,采用两个高自共振频率且电感值为 $500\text{ }\mu\text{H}$ 电感 ($f_r = 6\text{ MHz}$, $C_L = 1.4\text{ pF}$) 串联所对应的电子学噪声比采用一个 $L = 1\text{ mH}$ 、 $f_r = 1.6\text{ MHz}$ 电感时的电子学噪声降低约 4 dB . 由于电路对散粒噪声信号的增益并未发生变化,所以探测器的信噪比会相应提高 4 dB .

2.2 实验验证

为进一步实验验证 L-C 电路中电感的寄生电容对探测器电子学噪声的影响,采用如文献[12]所述的基于 L-C 耦合跨阻运放电路的散粒噪声探测器,实验测量了不同电感情况下探测器电子学噪声功率谱随分析频率的变化如图 4 所示,频谱仪视频带宽 $\text{VBW} = 30\text{ Hz}$,分辨率带宽 $\text{RBW} = 30\text{ kHz}$,扫描时间 $\text{SWT} = 1\text{ s}$.

由单个 1 mH 电感 ($f_r = 1.6$ MHz, $C_L = 10$ pF, $R_{L,0} = 14\Omega$) 时的电子学噪声和两个 500 μ H 的电感串联 ($f_r = 2.3$ MHz, $C_L = 10$ pF, $R_{L,0} = 12\Omega$) 时的电子学噪声,可以看出,采用两个电感串联的结构,可以使总的寄生电容小于单个电感的寄生电容,使输入电压噪声增益 Z_n 降低,从而降低了探测器电子学噪声.由两个 500 μ H 的电感串联 ($f_r = 6$ MHz, $C_L = 1.4$ pF, $R_{L,0} = 42\Omega$) 时的电子学噪声可见,采用高自共振频率的电感后,由于对应的寄生电容变低,电子学噪声进一步降低.相比采用一个 $L = 1$ mH、 $f_r = 1.6$ MHz 电感时的情况,在 2.5 MHz 处的电子学噪声降低了约 3 dB.比较图 3 和图 4 可见,在分析频率小于 2 MHz 时,理论计算的电子学噪声

比实验数据下降的更快,这主要是由于理论中未考虑寄生电阻随着分析频率逐渐增大导致的.当分析频率大于 2 MHz,采用两个高自共振频率电感串联的结构相比单个低自共振频率的电感,探测器电子学噪声之间的差值基本保持不变,实验结果与理论分析结果吻合良好.

3 结论

本文通过理论分析基于 L-C 耦合跨阻运放电路的散粒噪声探测器的噪声来源及其特性,提出了 L-C 耦合中电感的寄生电容对探测器的电子学噪声影响分析模型.通过分析得到,选用两个 0.5 mH 高自共振频率的电感串联结构相比选用单个 1 mH 低自共振频率的电感,可将探测器电子学噪声明显降低.并进一步进行了实验验证.实验测量结果表明,当总电感值为 1 mH 时,选用两个 0.5 mH、自共振频率为 6 MHz 的电感串联结构相比选用单个 1 mH、自共振频率为 1.6 MHz 的电感时的探测器电子学噪声明显降低.在 2.5 MHz 分析频率处,降低幅度达到 3 dB.实验结果与理论分析结果的良好吻合,验证了本文给出的电感噪声贡献模型的有效性,并进一步证实可以通过采用串联结构并降低电感的寄生电容来降低探测器的电子学噪声,进而提高探测器信噪比.

参考文献

- [1] PENG Kun-chi. Generation and application of squeezed state light: sub-shot-noise-limited optical measurement and quantum information[J]. *Physics*, 2001, **30**(5): 300-305.
彭堃堃. 光场压缩态的产生及其在亚散粒噪声光学测量和量子信息中的应用[J]. *物理*, 2001, **30**(5): 300-305.
- [2] WU L A, KIMBLE H J. Generation of squeezed states by parametric down conversion[J]. *Physical Review Letters*, 1986, **57**(20): 2520-2523.
- [3] BACHOR A, MANSON P J. Practical implication of quantum noises[J]. *Journal of Modern optics*, 1990, **37**(11): 1727-1740.
- [4] YUEN H P, CHAN V W. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. *Optics Letters*, 1983, **8**(3): 177-179.
- [5] APPEL J, HOFFMAN D, FIFUEROA E, et al. Electronic noise in optical homodyne tomography[J]. *Physical Review A*, 2007, **75**(3): 035802.
- [6] ZHOU Hai-jun, YANG Wen-hai. A bootstrapped, low-noise, and high-gain photodetector for shot noise measurement [J]. *Review of Scientific Instrument*, 2014, **85**(1): 013111.
- [7] GRAY M B, SHADDOCK D A, HARB C C, et al. Photodetector designs for low-noise, broadband, and high-power applications[J]. *Review of Scientific Instrument*, 1998, **69**: 3755-3762.
- [8] GROTE H. High power, low-noise, and multiply resonant photodetector for interferometric gravitational wave detectors [J]. *Review of Scientific Instrument*, 2007, **78**: 054704.
- [9] ZHOU Hai-jun, WANG Wen-zhe, ZHENG Yao-hui. Imporement of high-gain shot-noise detector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(11): 2737-2743.
周海军,王文哲,郑耀辉. 高增益散粒噪声探测器的性能改进[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(11): 2737-2743.
- [10] OPA657 datasheet TI corporation 2015.
- [11] JOHNSON M. Photodetection and measurement: maximizing performance in optical systems [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2003.

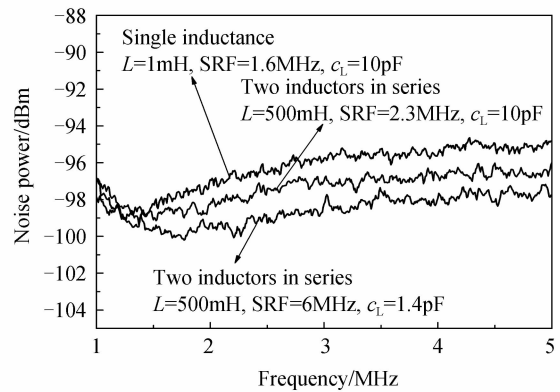


图 4 在不同电感组合下测量得到的探测器电子学噪声随分析频率的变化曲线

Fig. 4 Measured electronic noises of photodetector under different conditions of inductors

- [12] WANG Shao-feng, XIANG Xiao, DONG Rui-fang, *et al.* Simulation of high SNR photodetector with L-C coupling and transimpedance amplifier circuit and its verification[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2017, **88**(1): 013107.
- [13] JERALD G. Photodiode amplifiers op AMP solutions[M]. US: McGraw-Hill, 1995.
- [14] MASSARINI A, KAZIMIERCZUK M K. Self-Capacitance of Inductors[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1997, **12**(4): 671-676.
- [15] GRANDI G, KAZIMIERCZUK M K. Model of laminated iron-core inductors for high frequencies [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, **40**(4): 1839-1846.
- [16] NAISHADHAM K. Closed-form design formulas for the equivalent circuit characterization of ferrite inductors[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, **53**(4): 923-932.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 91336108, 11273024, 91636101, Y133ZK1101), the "Young Top-notch Talents" Program of Organization Department of the CPC Central Committee (No. [2013]33), the Research Equipment Development Project of Chinese Academy of Sciences and the Frontier Science Key Research Project of Chinese Academy of Sciences (No. QYZDB-SSWSLH007)